نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، ص. ۳۶۸-۳۵۵

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 16, No. 2, Summer. 2018, p. 355-368

تعیین غلظت و اسیدیته بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بر راندمان محلول‌پاشی گیاهچه‌های سیب‌زمینی

محمد کافی[1*] - بیژن سعادتیان[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

چکیده

نقش مؤثر سیلیسیم در بهبود خصوصیات گیاهی به اثبات رسیده است. ترکیبات حاوی این عنصر در غالب موارد به‌صورت برگ‌پاشی استفاده می‌شوند. از سویی، به نظر می‌رسد که اسیدیته محلول نقش مؤثری در کارایی این فرآیند ایفا نماید. لذا پژوهش حاضر جهت تعیین غلظت و اسیدیته بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم طی دو آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۲ انجام شد. در آزمایش تعیین غلظت بهینه، تیمارها شامل دو اندازه ذره سیلیسیم (نانو و میکرو) و غلظت‌های محلول‌پاشی در ۱۱ سطح (بدون محلول‌پاشی، آب مقطر+ مویان، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. تیمارهای آزمایش دوم شامل غلظت بهینه سیلیکات سدیم (۴۰۰ میلی گرم در لیتر)، آب مقطر و سه سطح اسیدیته (۵، ۷ و ۱۱/۳) برای غلظت بهینه سیلیسیم نانو و میکرو بود. نتایج آزمایش اول نشان داد که با افزایش غلظت سیلیسیم تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر صفات فتوسنتز، کلروفیل a و عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی افزایش معنی‌داری نشان داد. کاربرد سیلیسیم نانو و میکرو تا غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش پایداری غشای سلولی، کاهش تعرق برگی، افزایش کارایی مصرف آب، افزایش کلروفیل b و کارتنوئیدهای برگ سیب‌زمینی را در پی داشت و اثر نانو ذرات به‌طور معنی‌داری بیشتر از ذرات میکرو بود. اما در غلظت‌های بالا، هر دو اندازه ذرات سیلیسیم اثر منفی بر صفات مورد بررسی داشت. در آزمایش دوم، تأثیر نانو ذرات سیلیسیم در بهبود صفات شاخص پایداری غشای سلولی، کلروفیل b، میانگین وزن ریزغده و وزن خشک اندام هوایی به‌ترتیب ۵/۴، ۹/۷، ۹ و ۱۲ درصد بیشتر از ذرات میکرو بود. همچنین در تیمار محلول‌پاشی با اسیدیته ۵، صفات شاخص پایداری غشای سلولی، وزن خشک اندام هوایی و کارایی مصرف بیشترین افزایش را به‌ترتیب با ۸/۸، ۱۱/۶ و ۲۱/۳ درصد نسبت به اسیدیته ۱۱/۳ نشان دادند. کاهش اسیدیته محلول‌پاشی ذرات نانو و میکرو سیلیسیم از نظر آماری افزایش فتوسنتز، کاهش تعرق، افزایش عملکرد ریزغده و افزایش مقدار سیلیسیم اندام هوایی را نسبت به شاهد در پی داشت. در مجموع بهترین تیمار، غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم و اسیدیته ۵ بود.

واژه‌های کلیدی: شاخص پایداری غشاء سلولی، عملکرد ریزغده، فتوسنتز، کارایی مصرف آب، کلروفیل

مقدمه

هرچند سیلیسیم عنصری ضروری برای بسیاری از گیاهان محسوب نمی‌شود، اما اکثر گیاهان قادر به جذب سیلیسیم بوده و قابلیت جذب آنها در برخی موارد حتی تا ۱۰ درصد زیست توده نیز می‌رسد (Epstein, 1999). سیلیسیم در بسیاری موارد به‌عنوان یک عنصر مفید در علم تغذیه گیاهی شناخته می‌شود (Epstein, 1999; Tuna *et al.*, 2008; Haghighi and Pessarakli, 2013; Saadatian and Kafi, 2015). در برخی گزارشات عنوان شده که سیلیسیم در بهبود کارایی مصرف آب (Hu and Schmidhalter, 2005; Romero-Aranda *et al.*, 2006; Haghighi and Pessarakli, 2013)، افزایش فتوسنتز و کاهش اختلالات فیزیولوژیک (Adtina and Beasford, 1986; Samuels *et al.*, 1993; Romero-Aranda *et al.*, 2006; Tuna *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2010; Haghighi and Pessarakli, 2013) نقش مؤثری ایفا نموده و می‌تواند باعث افزایش تولید و کیفیت محصول شود (Cherif and Belanger, 1992; Samuels *et al.*, 1993; Nasri, *et al.*, 2008; Hashemi *et al.*, 2010; Saadatian and

۱- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: m.kafi@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/gsc.v16i2.57918

Kafi, 2015). رسوب سیلیسیم در دیواره سلولی می‌تواند افزایش استحکام و تقویت دیواره را درپی داشته (Epstein, 1999) و سبب پایداری غشاءهای زیستی شود (Liang *et al.*, 1996; Haghighi and Pessarakli, 2013).

گزارشات نشان داده که کاربرد سیلیسیم در گندم (*Triticum aestivum* L.) کاهش درصد نشت الکترولیت، افزایش رطوبت نسبی و افزایش محتوای کلروفیل a، b و مجموع آنها را در پی داشته است (Tuna *et al.*, 2008). همچنین یافته‌ها حاکی از افزایش قابل ملاحظه عملکرد خیار (*Cucumis sativus*) در تیمارهای ۱۰۰ الی ۲۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در لیتر بود (Cherif and Belanger, 1992). در ادامه، کاربرد غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیکات سدیم در محلول غذایی، علاوه بر افزایش غلظت سیلیسیم در بافت ریشه و اندام‌های هوایی، بر صفات وزن خشک ریشه، وزن خشک اندام هوایی، طول ریشه و ارتفاع گیاهان تیمار شده اثر مثبت و معنی‌داری داشت (Mohaghegh *et al.*, 2010). محلول‌پاشی سیلیسیم با غلظت ۶ در هزار سیلیکات سدیم نیز ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و بیولوژیک کلزا (*Brassica napus L.*) را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Nasri *et al.*, 2008).

در حال حاضر کشت بافت یکی از روش‌های جدید برای تکثیر غده‌های بذری سالم سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) است که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و منجر به تولید تعداد زیادی غده می‌شود (Lim *et al.*, 2004; Ozturk and Yildirim, 2010). پرورش گیاهچه‌های سیب‌زمینی جهت تولید ریزغده‌ها در محیط هیدروپونیک و بسترهای کشت صورت می‌گیرد. اگرچه تمامی عناصر غذایی مورد نیاز در این روش از طریق استفاده از محلول‌های غذایی تأمین می‌گردد، اما نقش تغذیه‌ای سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر مفید در تولید ریزغده‌ها مورد توجه قرار نگرفته است (Saadatian and Kafi, 2015).

امروزه جهت گسترش استفاده از نانو مواد به‌ویژه سیلیسیم در بخش کشاورزی تلاش‌هایی صورت گرفته است. در این رابطه گزارشات نشان داده که وزن خشک اندام هوایی و ریشه، میزان کلروفیل و کارتنوئید ذرت (*Zea mays* L.) تحت تأثیر غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر ذرات نانو و میکرو سیلیکون به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در هر یک از سطوح سیلیکون، اثر نانو ذرات در بهبود صفات به‌طور معنی‌داری بیشتر از ذرات میکرو بود (Zare *et al.*, 2016). در آزمایشی دیگر، بیشترین مقادیر صفات حداکثر فلورسانس کلروفیل، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II، عملکرد و تعداد ریزغده سیب‌زمینی در غلظت ۰/۳ میلی‌مولار ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم افزوده شده به محلول غذایی به‌دست آمد (Saadatian and Kafi, 2015). تأثیر مثبت نانو ذرات سیلیسیم بر پارامترهای فیزیولوژیک گیاهچه‌های گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) نیز تحت تنش شوری گزارش شده است (Haghighi and Pessarakli, 2013).

علی‌رغم عدم وجود اطلاعات کافی پیرامون اثر اسیدیته محلول بر کارایی جذب آن، این موضوع یکی از فاکتورهای تعیین‌کننده در مطالعات مرتبط با برگ‌پاشی عناصر و ترکیبات مختلف است و می‌تواند نقش مؤثری در تغییر نتایج داشته باشد (Wójcik, 2004). از سویی دیگر، در حالی‌که نتایج پیشین حاکی از اثرات سمیت گیاهی غلظت‌های بالای نانو ذرات بوده (Haghighi and Pessarakli, 2013; Saadatian and Kafi, 2015)، اما تحقیقی در زمینه تعیین غلظت بهینه نانو ذرات سیلیکات سدیم برای محلول‌پاشی سیب‌زمینی صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش تعیین غلظت و اسیدیته بهینه ذرات سیلیکات سدیم از طریق بررسی پارامترهای فتوسنتزی، رنگدانه‌ها، عملکرد و اجزای عملکرد ریزغده‌ها انجام شد و در سطوح بالاتر، کاربرد نانو ذرات بر خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد سیب‌زمینی داشت

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور تعیین غلظت بهینه محلول‌پاشی سیلیکات سدیم در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به‌صورت دو مرحله‌ای و در سال ۱۳۹۲ انجام شد. آزمایش اول به‌صورت فاکتوریل دو عاملی و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل شکل متداول سیلیکات سدیم در کنار نانو ذرات سیلیکات سدیم و غلظت‌های محلول‌پاشی در ۱۱ سطح (بدون محلول‌پاشی، آب مقطر+ مویان، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. هر تکرار شامل چهار بوته بود. اسیدیته ناشی از انحلال سیلیکات سدیم برای تیمارها توسط دستگاه pH متر ثبت گردید (جدول ۱). به هر یک از تیمارهای سیلیکات سدیم، مویان سیتوگیت با غلظت دو در هزار اضافه شد (Rashed Mohassel *et al.*, 2011). محلول‌پاشی در طی دو مرحله شروع استولون‌دهی و شروع غده‌دهی انجام شد.

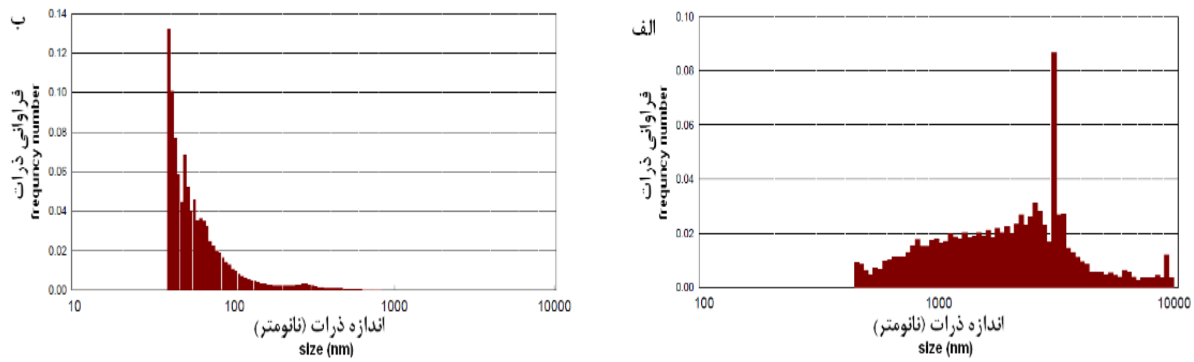
از طریق کشت گره سیب‌زمینی عاری از ویروس رقم آگریا در محیط درون شیشه‌ای، گیاهچه‌های سیب‌زمینی تولید شد. هر بوته گیاهچه در گلدان پلاستیکی با قطر دهانه و ارتفاع ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر قرار گرفت. بستر کشت با ترکیب پرلیت، کوکوپیت و ماسه به نسبت‌های ۴:۳:۳ تهیه شد. نیمی از بستر ابتدا و نیم دیگر طی فصل اضافه شد. تعیین میانگین قطر ذرات نانو و میکرو توسط اشعه ایکس و با دستگاه تعیین اندازه ذرات (PSA) مدل VASCO3 ساخت شرکت Cor Douan فرانسه (دقت اندازه‌گیری در بازه ۶

میکرون تا ۱ نانومتر) بود (شکل۱). میانگین قطر ذرات نانو و میکرو استفاده شده در آزمایش به‌ترتیب ۶۸ و ۲۳۷۱ نانومتر بود (Saadatian and Kafi, 2015). درجه خلوص هر دو اندازه ذرات ۹۹ درصد، جامد بی‌رنگ با جرم مولی ۱۲۲/۰۶ گرم بود. ذرات میکرو به‌صورت گرانول و ذرات نانو به‌صورت پودری بود.

جدول ۱- اسیدیته محلول‌های آزمایش اول

Table 1- Solutions pH of first experiment

اندازه ذرات Particle size	غلظت سیلیکات سدیم Concentration of sodium silicate (mg l^{-1})									
	آب مقطر Distilled water	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Micro میکرو	7.5	10.75	11.10	11.20	11.30	11.43	11.48	11.53	11.56	11.62
Nano نانو	7.5	10.81	11.10	11.17	11.32	11.34	11.47	11.51	11.56	11.61



شکل ۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیری قطر ذرات میکرو (الف) و نانو (ب) سیلیکات سدیم توسط دستگاه PSA

Figure 1- Results of diameter measured of micro (a) and nano (b) particles of sodium silicate with particle size analyzer

به‌منظور تغذیه گیاهچه‌های سیب‌زمینی از محلول غذایی هوگلند تغییر یافته استفاده شد (جدول ۲). محلول غذایی در طی فصل رشد و با فواصل زمانی هفت روز و به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر به هر گیاهچه اضافه شد. دمای روز و شب گلخانه به‌ترتیب ۲±۲۴ و ۲±۱۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۰ درصد تنظیم شده بود (Haghighi and Pessarakli, 2013). نور ورودی به گلخانه نور طبیعی خورشید بود و مقدار آن به‌طور متوسط در ساعت ۱۴ ظهر روز آفتابی ۱۲۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه بود. که توسط نورسنج نقطه‌ای اندازه‌گیری و ثبت گردید.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی و غلظت‌های محلول غذایی هوگلند تصحیح شده

Table 2- Chemical components and concentrations of modified Hoagland solution

ترکیب شیمیایی Chemical component	غلظت mg l^{-1}	ترکیب شیمیایی Chemical component	غلظت mg l^{-1}	ترکیب شیمیایی Chemical component	غلظت mg l^{-1}
NH_4NO_3	800	$Ca(NO_3)_2$	1180	KNO_3	490
$MgSO_4$	505	KH_2PO_4	68	H_3BO_3	2.86
$MnCl_2$	1.81	$ZnSO_4$	0.22	$CuSO_4$	0.05
Na_2MoO_4	0.12	Na-Fe-EDTA	42	-	-

یک هفته پس از محلول‌پاشی دوم و همزمان با هفته هشتم انتقال گیاهچه‌ها، در هر تکرار یک بوته انتخاب و از بالا به پایین دو برگ کاملاً توسعه‌یافته علامت‌گذاری شد. سپس پارامترهای فتوسنتزی برگ‌ها شامل فتوسنتز خالص و تعرق با دستگاه IRGA مدل LCi Consol تعیین شد. کارایی مصرف آب از تقسیم فتوسنتز به تعرق به‌دست آمد (Haghighi and Pessarakli, 2013). سپس برگ بالای علامت‌گذاری شده برای تعیین کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئیدها و برگ پایینی آن نیز برای تعیین شاخص پایداری غشای سلولی استفاده شد. از طریق استخراج رنگدانه‌ها با متانول ۹۹ درصد و در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۵۳ و ۶۶۶ نانومتر با استفاده از

اسپکتروفوتومتر Jenway UV/Vis مدل ۶۳۰۵، محتوای کلروفیل a، b (Arnon, 1949) و کاروتنوئیدها (Lichtenthaler and Wellburn, 1983) اندازه‌گیری شد. دومین برگ بالایی علامت‌گذاری شده از هر تکرار جدا و به مدت ۲۴ ساعت در داخل ویال‌های حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت. سپس هدایت‌الکتریکی اولیه (EC_1) اندازه‌گیری شد. در ادامه ویال‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۳ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ بار اتوکلا شده و پس از سردشدن، هدایت‌الکتریکی ثانویه (EC_2) قرائت و شاخص پایداری غشاء توسط معادله ۱ به‌دست آمد (Sairam, 1994).

$$MI = [(1-(EC1/EC2)]\times 100$$ معادله (۱)

پس از حدود ۹۰ روز از انتقال گیاهچه‌ها به محیط کشت، گیاهچه‌های سیب‌زمینی کف‌بر شده و بخش هوایی آن به آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۸ انتقال یافت. سپس وزن خشک اندام هوایی با ترازوی دارای دقت یک هزارم گرم اندازه‌گیری شد. پس از تخلیه بستر گلدان‌ها، تعداد ریزغده هر بوته شمارش و وزن ریزغده‌ها و عملکرد هر بوته توسط ترازوی با دقت یک هزارم گرم تعیین شد. اندازه‌گیری غلظت سیلیسم اندام هوایی سیب زمینی با استفاده از روش رنگ‌سنجی مولیبدات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Elliot and Snyder, 1991). تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS و رسم شکل‌ها با نرم‌افزار Excel صورت گرفت. در صورت عدم معنی‌داری اثرات در تجزیه واریانس، از ارائه نتایج آن صرف‌نظر شد. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح احتمال پنج درصد با آزمون LSD انجام شد.

آزمایش دوم به‌صورت فاکتوریل دو عاملی و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل غلظت بهینه سیلیکات سدیم نانو و میکرو (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و شاهد (آب مقطر) و سه سطح اسیدیته (اسیدیته ناشی از انحلال غلظت بهینه سیلیسیم نانو و میکرو در آب (pH=۱۱/۳)، pH=۷ و pH=۵) برای آب و دو اندازه ذره بود. به‌منظور تنظیم اسیدیته محلول‌ها از اسید کلریدریک یک صدم نرمال استفاده شد. تمامی مراحل تهیه گیاهچه، کشت، محلول‌پاشی، اندازه‌گیری صفات و تجزیه تحلیل داده‌ها مشابه آزمایش اول انجام گرفت.

نتایج و بحث

آزمایش تعیین غلظت بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم

محلول‌پاشی غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذارت سیلیکات سدیم بیشترین تأثیر مثبت را بر شاخص پایداری غشای سلولی برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی داشت. با افزایش غلظت نانو ذرات تا سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، شاخص پایداری غشای سلولی در مقایسه با تیمارهای بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با آب مقطر به‌طور معنی‌داری بیشتر بود، اما با افزایش غلظت نانو ذرات از سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، پایداری غشای سلولی برگ سیب‌زمینی کاهش معنی‌داری نشان داد، به‌طوری‌که در سطوح بالاتر از۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، مقادیر به‌دست آمده به‌طور معنی‌داری کمتر از شرایط عدم مصرف سیلیکات سدیم بود (جدول ۴). کاربرد ذرات میکرو سیلیکات سدیم در سطوح ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیر مثبت و معنی‌داری بر پایداری غشای سلولی برگ سیب‌زمینی داشت. اما در سطوح بالاتر، محلول‌پاشی سیلیکات سدیم میکرو سبب کاهش شاخص پایداری غشای سلولی شد. به‌طوری‌که در بالاترین غلظت نسبت به تیمار بدون محلول‌پاشی ۹/۵ درصد افت داشت. اگرچه تأثیر مثبت غلظت‌های مشابه نانو ذرات تا سطح ۲۰۰ میلی‌گرم لیتر در مقایسه با ذرات میکرو ۱۰ درصد بالاتر بود، اما به‌طور کلی در سطوح بالاتر از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، تأثیر منفی نانو ذرات بر شاخص پایداری غشای سلولی بیشتر از ذرات میکرو بود (جدول ۴).

تحقیقات بسیاری نشان‌دهنده تأثیر مثبت غلظت‌های بهینه سیلیسیم بر افزایش پایداری غشای سلولی است. گزارشات از تأثیر معنی‌دار سیلیسیم بر کاهش درصد نشت الکترولیت برگ گندم در هر دو شرایط تنش شوری و عدم تنش حکایت داشته (Tuna *et al.*, 2008)، در ادامه یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت ذرات میکرو و نانو سیلیکات سدیم بر پایداری غشای سلولی برگ‌های سیب‌زمینی در غلظت‌های ۰/۳ و ۰/۶ میلی‌مولار بود. همچنین در سطوح بالاتر، اثرات منفی نانو ذرات بر شاخص پایداری غشای سلولی مشاهده شد (Saadatian and Kafi, 2015) که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت داشت. محققان در رابطه با نقش سیلیسیم بر پایداری غشای سلولی، رسوب سیلیسیم در دیواره سلولی را موجب افزایش استحکام و تقویت دیواره دانسته (Epstein, 1999) و آن را عاملی در جهت افزایش پایداری غشاهای زیستی می‌دانند (Liang *et al.*, 1996; Haghighi and Pessarakli, 2013). اما همانطور که نتایج نشان داده این عنصر در سطوح غلظت مناسب چنین تأثیر مثبتی را بر شاخص پایداری غشای سلولی خواهد داشت.

فتوسنتز برگ تیمار نانو ذرات در مقایسه با ذرات میکرو به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (شکل a،۲). فتوسنتز برگ در سطوح ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۳). به‌طوری‌که بالاترین مقدار آن در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که در مقایسه با تیمارهای بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با آب مقطر به‌ترتیب ۳۸ و ۱۸ درصد بیشتر بود. اما در سطوح ۵۰۰ الی ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر، فتوسنتز برگ در مقایسه با سطوح پایین‌تر (۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم)

کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). یافته‌های محققان نشان داده که تغذیه با غلظت بهینه سیلیسیم، از طریق افزایش عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π نقش مؤثری در بهبود فتوسنتز برگ سیب‌زمینی دارد (Saadatian and Kafi, 2015). در ادامه نیز گزارش شده که غلظت مناسب سیلیکات سدیم فتوسنتز برگ گیاهچه‌های موز (*Musa sapientum*) را افزایش داد (Asmar *et al.*, 2013). در مطالعه‌ای دیگر، غلظت بهینه ۱ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیسیم بیشترین تأثیر را بر فتوسنتز برگ گوجه‌فرنگی داشت و در سطوح بالاتر اثر منفی نانو ذرات بر فتوسنتز مشاهده شد (Haghighi and Pessarakli, 2013) که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. همچنین عنوان شده که کاربرد سیلیسیم جهت تولید غلظت‌های بالاتر آنزیم ریبولوزبی فسفات کربوکسیلاز در برگ لازم است. این آنزیم سوخت و ساز دی‌اکسید کربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارایی تثبیت دی اکسید کربن توسط گیاهان را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (Adtina and Beasford, 1986). اما همانطور که از نتایج این تحقیق و سایر مطالعات (Mohaghegh *et al.*, 2010; Haghighi and Pessarakli, 2013; Saadatian and Kafi, 2015) برمی‌آید، سیلیسیم در غلظت‌های مناسب سبب تأثیرات مثبت بر چرخه فتوسنتزی و عوامل درونی آن می‌شود.

با کاربرد تیمارهای ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکات سدیم تعرق برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی کاهش معنی‌داری در مقایسه با تیمار بدون محلول‌پاشی داشت. اما با کاربرد سطوح بالاتر نانو ذرات، تعرق برگی به‌تدریج افزایش یافت به‌طوری‌که در تیمارهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار آن در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی به‌ترتیب ۱۵، ۱۸ و ۲۰ درصد بالاتر بود (جدول ۴). اگرچه محلول‌پاشی غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ذرات میکرو تعرق برگ سیب‌زمینی را در مقایسه با سطح بدون محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری کاهش داد، اما در سطوح بالاتر تأثیر ذرات میکرو بر صفت یاد شده مثبت بود (جدول ۴). مقایسه سطوح محلول‌پاشی دو اندازه ذره نشان می‌دهد که در هر یک از سطوح ۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اثر کاهشی نانو ذرات بر تعرق برگی در مقایسه با ذرات میکرو به‌طور معنی‌داری بیشتر بوده است. اما در غلظت‌های ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر تعرق برگی تیمار نانو ذرات به‌ترتیب ۱۲ و ۱۶ درصد بیشتر از تیمار میکرو بود (جدول ۴). در آزمایش انجام شده تحت شرایط تنش ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، تعرق برگ گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی تحت تیمار ۱ میلی‌مولار نانو سیلیسیم افزایش معنی‌داری نشان داد. اما غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم نانو هر دو صفت را به کمترین مقدار رساند، اگرچه روند تغییرات تعرق در تحقیق حاضر برخلاف نتایج فوق‌الذکر بود، اما روند معکوس تغییرات صفت تعرق در دو سطح غلظت سیلیسیم نشان‌دهنده تأثیر متفاوت سطوح مختلف سیلیسیم بر تعرق برگی و وجود حد بهینه برای کاربرد سیلیسیم در تغذیه گیاهی است (Haghighi and Pessarakli, 2013).

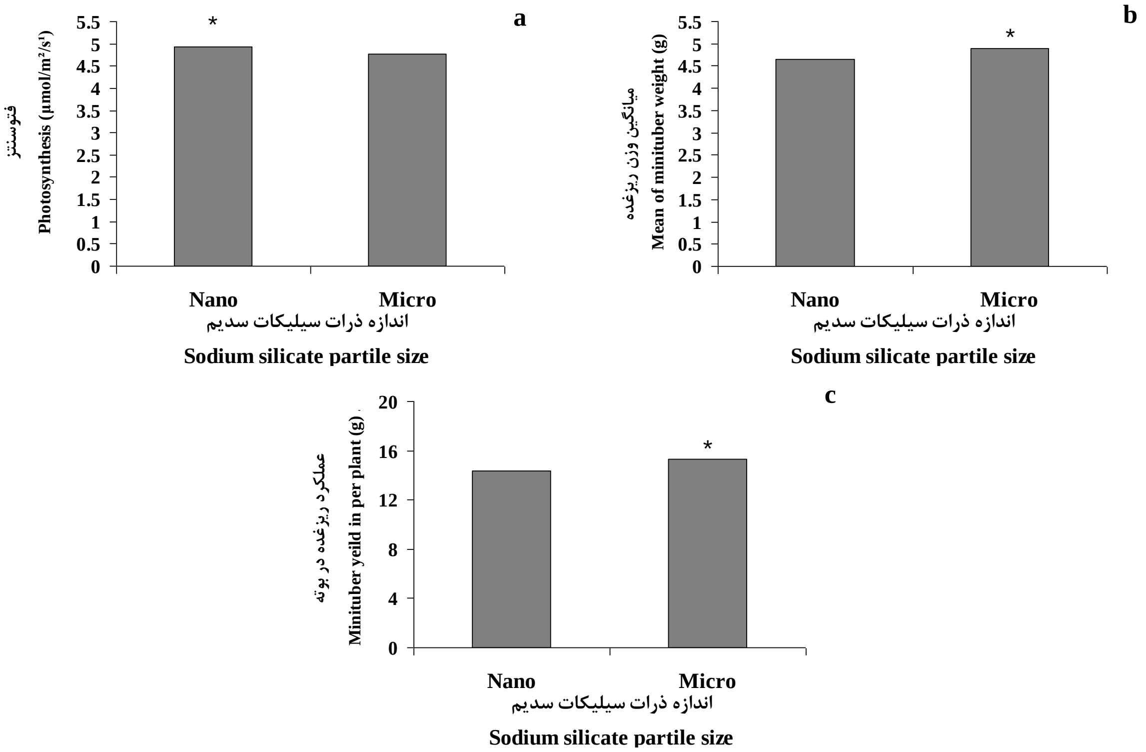
بیشترین کارایی مصرف آب در تیمارهای ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکات سدیم به‌دست آمد و از این نظر اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای یاد شده وجود نداشت. محلول‌پاشی ذرات میکرو تنها در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب برگ سیب‌زمینی را نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی موجب شد (جدول ۴). علی‌رغم تأثیر بالاتر نانو ذرات نسبت به ذرات میکرو بر کارایی مصرف آب در هر‌یک از تیمارهای ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، افزایش غلظت نانو ذرات از سطوح یاد شده سبب تأثیر منفی بیشتر نسبت به ذرات میکرو بر صفت یاد شده گردید (جدول ۴). یافته‌های دیگر نیز نشان‌دهنده افزایش کارایی مصرف آب لحظه‌ای در تنش شوری با مصرف سیلیسیم در گیاه شورزیست *Spartina densiflora* (Mateos-Naranjo *et al.*, 2013) و گوجه‌فرنگی (Haghighi and Pessarakli, 2013) بود. همچنین در آزمایشی دیگر کارایی مصرف آب لحظه‌ای گوجه‌فرنگی با افزودن سیلیسیم به محلول غذایی هوگلند، افزایش نشان داد (Romero-Aranda *et al.*, 2006). در ادامه، کارایی مصرف آب لحظه‌ای گیاهچه‌های موز نیز در اثر مصرف سیلیسیم بهبود یافت (Asmar *et al.*, 2013).

بیشترین غلظت کلروفیل a به‌ترتیب با ۳۲ و ۳۸ درصد افزایش نسبت به تیمار صفر در تیمارهای ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم به‌دست آمد. اما با افزایش غلظت سیلیکات سدیم از سطوح یاد شده، مقدار کلروفیل a کاهش معنی‌داری نشان داد به‌طوری‌که در بالاترین سطح، غلظت کلروفیل a نسبت به تیمارهای صفر و آب مقطر به‌ترتیب ۱۴ و ۲۶ درصد افت نشان داد (جدول ۳). محلول‌پاشی هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم تا غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب افزایش معنی‌دار غلظت کلروفیل b نسبت به تیمارهای عدم کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۴). اما با افزایش غلظت هر دو اندازه ذره نانو و میکرو، غلظت کلروفیل b کاهش معنی‌داری نسبت به تیمارهای صفر (عدم محلول‌پاشی) و آب مقطر نشان داد (جدول ۴). با افزایش غلظت سیلیکات سدیم نانو و میکرو تا سطح ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر، غلظت کارتنوئید برگ به‌ترتیب با ۹۶ و ۷۴ در رشد نسبت به سطح صفر، افزایش معنی‌داری نشان داد. اما با افزایش غلظت هر دو اندازه ذره غلظت کارتنوئیدها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که بالاترین غلظت کاربرد هر دو اندازه ذره نانو و میکرو غلظت کارتنوئیدهای برگ سیب‌زمینی تنها ۳ و ۱۱ درصد بالاتر از تیمار صفر بود (جدول ۴).

جدول ۳- مقایسه میانگین سطوح محلول‌پاشی سیلیکات سدیم در صفات فتوسنتز، کلروفیل، عملکرد و اجزای عملکرد ریزغده گیاهچه‌های سیب‌زمینی

Table 3- Mean comparison of foliar application levels of sodium silicate on seedling potato photosynthesis, chlorophyll, yield and yield components of minitubers

غلظت سیلیکات سدیم Sodium silicate concentration (mg l^{-1})	فتوسنتز Photosynthesis (µmol CO_2 m^{-2} s^{-1})	غلظت کلروفیل a Chlorophyll a (mg g^{-1}FW)	تعداد ریزغده در بوته Minituber number per plant	میانگین وزن ریزغده Mean of mini-tuber weight (g)	عملکرد ریزغده Mini-tuber yield (g per plant)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g per plant)
Zero	4.79	0.382	3.12	4.682	14.40	1.495
water	4.76	0.445	2.91	4.698	13.56	1.482
100	5.10	0.464	3.12	5.273	16.34	1.458
200	5.24	0.465	3.35	4.965	16.56	1.457
300	5.27	0.503	3.44	4.819	16.51	1.528
400	5.49	0.527	3.36	4.952	16.55	1.518
500	4.59	0.466	3.15	4.830	15.18	1.516
600	4.70	0.430	3.06	4.559	13.97	1.499
700	4.24	0.429	3.15	4.389	13.80	1.486
800	4.70	0.375	2.74	4.874	13.36	1.431
900	4.51	0.327	2.79	4.586	12.76	1.455
LSD 5%	0.352	0.035	0.347	0.467	1.02	0.037



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر اندازه ذرات سیلیکات سدیم بر صفات فتوسنتز برگ (a)، میانگین وزن ریزغده (b) و عملکرد ریزغده در بوته (c). علامت ستاره (*) نشان‌دهنده برتری تیمار مورد نظر با آزمون LSD در سطح پنج درصد است.

Figure 1- Mean comparison effects of sodium silicate size on leaf photosynthesis (a), mean of mini-tuber weight (b) and mini-tuber yield in plant (c). Symptom star was indicated performance of treatment with LSD 5 %.

اگرچه روند تغییرات دو اندازه ذره مشابه بود، اما بیشترین غلظت کارتنوئیدهای برگ در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم نـانو ذرات بـه‌دسـت آمـد

(جدول ۴). مشابه نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، مطالعه بر روی گیاه گوجه‌فرنگی نیز نشان داد که در شرایط شور، غلظت ۱ میلی‌مولار ذرات سیلیسیم نانو و میکرو تأثیر مثبت بر محتوای کلروفیل برگ داشت (Haghighi and Pessarakli, 2013) همچنین گزارشات نیز حاکی از افزایش معنی‌داری محتوای کلروفیل a، b و مجموع آنها در برگ گندم (Tuna *et al.*, 2008) و کلزا (Hashemi *et al.*, 2010) در هر دو شرایط تنش شوری و عدم تنش در غلظت بهینه سیلیسیم بود. در ادامه یافته‌های آزمایشی دیگر مبین تأثیر مثبت غلظت‌های مناسب ذرات نانو و میکرو سیلیکون بر میزان کلروفیل و کارتنوئید ذرت بود. همچنین در هر یک از سطوح سیلیکون اثر نانو ذرات در بهبود صفات مرتبط با رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (Zare *et al.*, 2016) که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مطابقت داشت.

علی‌رغم تغییرات صفت تعداد ریزغده در بوته، کاربرد غلظت‌های ۱۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم تأثیر معنی‌داری بر صفت فوق‌الذکر در مقایسه با تیمارهای صفر (عدم محلول‌پاشی) و آب مقطر نداشت و حتی در تیمار ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر تعداد ریزغده در بوته در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی از نظر آماری کمتر بود (جدول ۳). میانگین وزن ریزغده در تیمار ذرات میکرو سیلیکات سدیم نسبت به نانو ذرات به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (شکل ۲، b). تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم تأثیر مثبت و معنی‌داری بر میانگین وزن ریزغده‌های سیب‌زمینی داشت. اما در سایر سطوح سیلیکات سدیم نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی تفاوتی مشاهده نشد (جدول ۳). بیشترین عملکرد ریزغده سیب‌زمینی در تیمار میکرو سیلیکات سدیم با ۶/۲ درصد افزایش نسبت به نانو ذرات به‌دست آمد (شکل ۲، c). کاربرد برگی تیمارهای ۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم عملکرد ریرغده‌های سیب‌زمینی را در مقایسه با عدم محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری افزایش داد و بین تیمارهای سیلیکات سدیم در سطوح غلظت یاد شده تفاوت آماری وجود نداشت (جدول ۳). با افزایش غلظت سیلیکات سدیم از ۵۰۰ تا ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی ۱۶ درصد کاهش نشان داد. به‌طوری‌که در دو غلظت بالای سیلیکات سدیم عملکرد ریزغده در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری کمتر بود (جدول ۳).

اگرچه بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم به‌دست آمد، اما کاربرد سیلیکات سدیم تا غلظت ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در صفات یاد شده نگردید و حتی در غلظت‌های ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر وزن خشک اندام هوایی سیب‌زمینی نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی از نظر آماری کاهش معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). مشابه نتایج به‌دست آمده، وزن خشک اندام هوایی ذرت تحت تأثیر کاربرد غلظت‌های مناسب نانو و میکرو ذرات سیلیکون به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Zare *et al.*, 2016). همچنین محلول‌پاشی سیلیسیم با غلظت بهینه ۶ در هزار سیلیکات سدیم عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک کلزا را در شرایط مزرعه‌ای به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Nasri, *et al.*, 2008). مطابق با نتایج حاضر، محققان دیگر نیز گزارش کردند که کاربرد غلظت‌های بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم تأثیر مثبت بر عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی داشته و افزایش مقادیر سیلیسیم از حد بهینه تأثیر منفی بر عملکرد خواهد داشت. همچنین یافته‌های ایشان نشان داد که عملکرد ریزغده با افزایش غلظت ذرات میکرو به‌طور معنی‌داری بیشتر شد. اما تأثیر مثبت ذرات نانو بر صفت یاد شده تا سطح ۰/۳ میلی‌مولار بود. به‌طور کلی اثرات مثبت کاربرد نانو ذرات به دلیل کارایی جذب بالا، در غلظت‌های پایین ظهور یافت. اما در سطوح بالاتر، بر خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد سیب‌زمینی اثرات فیتوتوکسینی داشت (Saadatian and Kafi, 2015). در رابطه با افزایش عملکرد گیاه در حضور غلظت بهینه سیلیسیم عنوان شده که این عنصر از طریق بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی، رشد و عملکرد را بهبود می‌دهد (Samuels *et al.*, 1993). در ادامه، محققان تأثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه را به‌دلیل رسوب آن در پهنای برگ و نیز افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ مرتبط دانسته‌اند (Adtina and Beasford, 1986). در آزمایش حاضر نیز روند تغییرات مشابه فتوسنتز، کلروفیل با وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریزغده، این موضوع را تأیید می‌نماید.

با افزایش غلظت هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم، غلظت و مقدار سیلیسیم در اندام هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش نشان داد (جدول ۴). بین اندازه ذرات در هر یک از سطوح تیماری ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری در غلظت سیلیسیم اندام هوایی مشاهده نشد. اما در هر یک از سطوح غلظت ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر، غلظت سیلیسیم اندام هوایی تیمار محلول‌پاشی نانو ذرات به‌ترتیب ۲، ۳، ۵، ۴ و ۶ درصد بیشتر از ذرات میکرو بود. همچنین بالاترین غلظت سیلیسیم موجود در اندام هوایی گیاهچه‌های سیب‌زمینی (۳/۰۳ گرم در گرم وزن خشک)، در تیمار ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات به‌دست آمد (جدول ۴). اگرچه با افزایش غلظت هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم، مقدار سیلیسیم موجود در اندام هوایی افزایش معنی‌داری در مقایسه با هر یک از تیمارهای عدم محلول‌پاشی و آب مقطر نشان داد، اما بین تیمار نانو و میکرو در اکثر سطوح محلول‌پاشی تفاوت آماری وجود نداشت و تنها در هر یک از تیمارهای ۴۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار

سیلیسیم اندام هوایی تیمار نانو در مقایسه با تیمار میکرو افزایش معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل اندازه ذرات سیلیکات سدیم و سطوح غلظت در صفات شاخص پایداری غشا، تعرق، کارایی مصرف آب، رنگدانه‌ها، غلظت و محتوای سیلیسیم اندام هوایی گیاهچه‌های سیب زمینی

Table 4- Mean comparison of interaction between sodium silicate size and concentration levels on membrane stability index. Transpiration, water use efficiency, pigments, concentration and amount of Si in shoots of seedling potato

اندازه ذرات سیلیکات سدیم Particle size of sodium silicate	غلظت Concentration ($mg\ l^{-1}$)	صفات Trails						
		شاخص پایداری غشای سلولی Membrane stability index (%)	تعرق Transpiration ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	کارایی مصرف آب Water use efficiency ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)	کلروفیل b Chlorophyll b ($mg\ g^{-1}FW$)	غلظت کارتنوئیدها Carotenoids ($mg\ g^{-1}FW$)	غلظت Si در اندام هوایی Si concentration in shoot ($mg\ g^{-1}DW$)	مقدار سیلیسیم در اندام هوایی Si amount in shoot (g)
نانو Nano	Zero	59.9	2.96	1.62	0.483	0.378	1.50	2.24
	water	59.6	3.19	1.49	0.509	0.362	1.51	2.24
	100	70.8	2.57	2.13	0.579	0.512	1.68	2.45
	200	72.9	2.19	2.55	0.643	0.575	1.84	2.69
	300	66.9	2.06	2.68	0.651	0.641	1.89	2.91
	400	61.5	2.2	2.48	0.563	0.739	2.32	3.61
	500	55.1	2.35	2.06	0.525	0.521	2.43	3.66
	600	42.1	3.00	1.59	0.539	0.537	2.61	3.89
	700	37.3	3.42	1.29	0.458	0.466	2.85	4.22
	800	42.0	3.49	1.28	0.423	0.368	2.90	4.10
	900	42.1	3.55	1.25	0.416	0.391	3.03	4.40
میکرو Micro	Zero	59.9	2.96	1.62	0.483	0.378	1.50	2.24
	water	59.6	3.19	1.49	0.509	0.362	1.51	2.24
	100	60.5	2.69	1.81	0.538	0.469	1.67	2.43
	200	62.5	2.95	1.68	0.632	0.674	1.83	2.66
	300	66.7	2.99	1.69	0.594	0.611	1.92	2.91
	400	66.4	2.59	2.14	0.638	0.658	2.30	3.40
	500	48.4	3.12	1.39	0.533	0.490	2.40	3.66
	600	51.5	3.10	1.50	0.468	0.452	2.54	3.83
	700	50.0	3.57	1.14	0.442	0.452	2.72	4.06
	800	45.8	3.08	1.61	0.429	0.428	2.80	4.06
	900	50.1	2.97	1.55	0.444	0.420	2.85	4.16
LSD 5%		5.44	0.380	0.260	0.0499	0.0627	0.053	0.123

همـانطور کـه نتـایج نشـان داده، افـزایش غلظـت محلـول‌هـای سیلیکاته نانو و میکرو افزایش جذب را در بخش هوایی سیب‌زمینی در پی داشته است. در این رابطه محققان بیان داشـتند کـه بـین غلظـت پاشش مواد معدنی بر روی سطح برگ و سـرعت جـذب آنهـا توسـط سلول‌های اپیدرمی همبسـتگی بسـیار زیـادی وجـود دارد (Wójcik, 2004).

به‌طور کلی در فاز اول، با افزایش غلظت سیلیکات سدیم تـا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر صفات فتوسنتز، کلروفیل a و عملکـرد ریزغـده‌هـای سیب‌زمینی افزایش معنی‌داری نشان داد. اما در سطوح بالاتر، مقـادیر صفات یاد شده کاهش نشان داد. کاربرد برگی سیلیکات نانو و میکـرو تا غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش پایداری غشای سلولی، کاهش تعـرق برگـی، افـزایش کـارایی مصـرف آب، افـزایش کلروفیـل b و کارتنوئیدهای برگ سیب‌زمینی را در پی داشت. اما با افزایش غلظـت هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم اثر مثبت آنهـا بـر صـفات کـاهش یافت. اگرچه با افزایش غلظت محلول‌پاشی سیلیکات سدیم، غلظت و مقدار سیلیسیم در تیمارهای نانو و میکرو افزایش یافت، اما با توجه به نتایج حاصل از صـفات بیوشـیمیایی، فتوسـنتزی و عملکـرد ریزغـده، افزایش سیلیسیم در بافت گیاهی تا غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر هـر دو اندازه ذره تأثیر مثبتی بر گیاهچه‌های سیب‌زمینی در پی داشـت. از این رو در فاز بعدی آزمایش غلظت بهینه به‌دست آمده مـورد اسـتفاده قرار گرفت.

آزمایش تعیین اسیدیته بهینه سیلیکات سدیم

بیشترین شـاخص پایـداری غشـای سـلولی در تیمـار نـانو ذرات سیلیکات سدیم به‌دست آمد (جدول ۵). همچنین تحت تأثیر افـزایش اسیدیته محلول، شاخص پایداری غشای سلولی کاهش نشان داد و در اسیدیته ۱۱/۳ این تفاوت معنی‌دار بود (شکل ۳، a).

اسیدیته ۱۱/۳ و ۵ آب، فتوسنتز برگ را در مقایسه بـا اسـیدیته ۷ به‌ترتیب ۱۸ و ۲۷ درصد تقلیل داد (جدول ۶). در هـر یـک از سـطوح اسیدیته محلول، تفاوت آماری بین ذرات نانو و میکرو از نظر فتوسـنتز بـرگ وجـود نداشـت. امـا در هـر یـک از تیمارهـای نـانو و میکـرو، اسـیدیته‌هـای ۷ و ۵ در مقایسـه بـا اسـیدیته ۱۱/۳ مقـادیر فتوسـنتز بـالاتری داشـت (جـدول ۶). آب دارای اسـیدیته ۵ در مقایسـه بـا اسیدیته‌های دیگر آن، تعرق برگ گیاهچه‌های سیب زمینی را به‌طـور معنی‌داری کاهش داد. در هر یک از سطوح اسـیدیته محلـول، تعـرق برگی تیمارهای نانو و میکرو سیلیکات سدیم در مقایسه با آب به‌طـور معنی‌داری کمتر بود. اما بین تیمارهـای نـانو و میکـرو در هـر سـطح اسیدیته از این نظر تفاوتی مشاهده نشد (جدول ۶). کارایی مصرف آب ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم در مقایسه با آب به‌ترتیب ۸۰ و ۸۵ درصد بالاتر بود و تفاوتی بین دو اندازه ذره در صفت یاد شده مشاهده نشد (جدول ۶). کاهش اسیدیته محلول باعث افزایش کارایی مصـرف آب برگ سیب‌زمینی شد و در اسیدیته ۵ این کارایی به حداکثر مقـدار خود رسید (شکل ۳، b).

غلظـت کلروفیـل a، کلروفیـل b و کارتنوئیـدها در تیمـار ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سـیلیکات سـدیم نسـبت بـه آب بـه‌طـور معنی‌داری بیشتر بود. اما تیمار ذرات میکرو از نظـر صـفات یـاد شـده تفاوتی با تیمار آب نشان نداد (جدول ۶). میـانگین وزن ریزغـده‌هـای سیب‌زمینی در تیمار نـانو ذرات در مقایسـه بـا تیمارهـای آب و ذرات میکرو به‌ترتیب ۱۱ و ۱۲ درصد بالاتر بود و از این نظر با هـر یـک از تیمارهای یاد شده اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۶). در تیمـار آب، کاهش اسیدیته اثر منفی بر تولید ریزغده سیب‌زمینـی داشـت. امـا در تیمارهای نانو و میکرو سیلیکات سدیم، بـا کـاهش اسـیدیته محلـول افزایش معنی‌دار عملکرد ریزغده در بوته حاصل شد. به‌طوری‌که تیمار ۵ بیشترین مقادیر صفت یـاد شـده را در هـر دو انـدازه ذره بـه خـود اختصـاص داد. همچنـین در اسـیدیته یـاد شـده، عملکـرد ریزغـده سیب‌زمینی تیمار نانو ذرات با ۲۰ درصد اختلاف نسبت به تیمار میکرو برتری داشت (جدول ۶). وزن خشک اندام هوایی تیمـار نـانو ذرات در مقایسه با هر یک از تیمارهای آب و میکرو به‌طور معنـی‌داری بیشـتر بود (جدول ۵). نتـایج نشـان داد کـه در تیمارهـای محلـول‌پاشـی بـا اسیدیته ۵ و ۷، وزن خشک انـدام هـوایی در مقایسـه بـا تیمـار ۱۱/۳ افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۳، c).

اگرچه با کاهش اسیدیته آب از ۱۱/۳ به ۷ و ۵ غلظـت سیلیسـیم اندام هوایی به‌ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد کاهش نشان داد، اما در هر یک از تیمارهای نانو و میکرو سیلیکات سدیم تغییر معنی‌داری بین سطوح اسدیته از این نظر مشاهده نشد. همچنین نتایج مؤید افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم اندام هوایی در اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم نانو و میکرو در اسیدیته‌های مورد آزمایش بود نسبت به آب بود (جـدول ۶). برخلاف غلظت، مقدار سیلیسـیم در بـین تیمارهـای نـانو و میکـرو و سطح اسیدیته تغییرات مشهودی نشان داد. به‌طوری‌کـه در هریـک از سـطوح انـدازه ذرات نـانو و میکـرو سـیلیکات سـدیم، محلـول‌پاشـی اسیدیته‌های ۷ و ۵، مقدار سیلیسیم تجمع‌یافته در انـدام هـوایی را در مقایسه با اسیدیته ۱۱/۳ به‌طور میانگین ۷ و ۹ درصد افـزایش نشـان داد و بین سطوح ۵ و ۷ اسیدیته در هر سطح اندازه ذره، تفاوت آماری مشاهده نشد (جدول ۶).

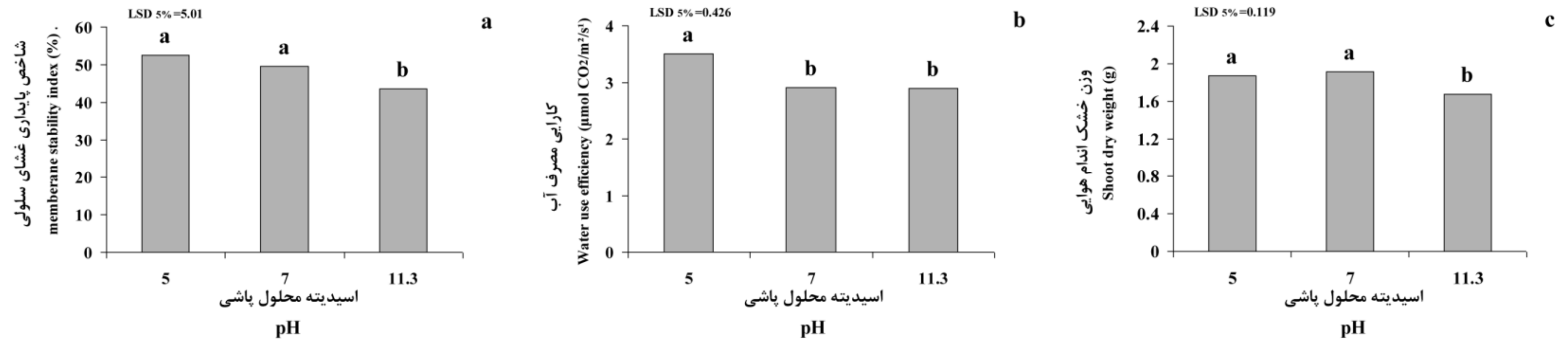
نتایج حاصل از آزمایش دوم حاکی از تأثیر مثبت کاهش اسـیدیته محلول سیلیکاته نانو و میکرو بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد ریزغده سیب‌زمینی بود. در این رابطه محققان عنـوان داشـته‌انـد کـه از لایـه واکسی کوتیکولی تا لایه پکتینی برگ یک شیب افزایشـی حاصـل از بار منفی، عامل ایجادکننده یـک گرادیـان الکتروشـیمیایی اسـت کـه

موجب افزایش حرکت کاتیون‌ها و ملکول‌های آب می‌گردد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار محلول‌پاشی بر صفات شاخص پایداری غشاء، کارایی مصرف آب، غلظت رنگدانه‌ها، میانگین وزن ریزغده و وزن خشک اندام هوایی گیاهچه‌های سیب‌زمینی

Table 5- Mean comparison effect of spraying type on membrane stability index, water use efficiency, pigments concentration, mean of mini-tuber weight and soot dry weight of seedling potato

نوع تیمار محلول‌پاشی Foliar application treatments	صفات Trials						
	شاخص پایداری غشای سلولی Membrane stability index (%)	کارایی مصرف آب Water use efficiency ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)	کلروفیل a Chlorophyll a ($mg\ g^{-1}FW$)	کلروفیل b Chlorophyll b ($mg\ g^{-1}FW$)	کارتنوئیدها Carotenoids ($mg\ g^{-1}FW$)	میانگین وزن ریزغده Mean of mini-tuber weight (g)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g)
Water	43.6	2.0	0.70	0.29	0.107	5.05	1.76
Micro Si	48.3	3.6	0.77	0.31	0.111	5.17	1.74
Nano Si	53.7	3.7	0.85	0.34	0.121	5.64	1.95
LSD 5%	5.01	0.42	0.088	0.037	0.0108	0.460	0.119



شکل۳- مقایسه میانگین اثر اسیدیته محلول‌پاشی بر صفات پایداری غشای سلولی (a)، کارایی مصرف آب (b) و وزن خشک اندام هوایی (c) گیاهچه‌های سیب‌زمینی. میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD ندارند.

Figure 2- Mean comparison of foliar application acidity effect on membrane stability index (a), water use efficiency (b), and shoot dry weight (c) of seedling potato. The means of similar letters not significant difference with LSD 5%.

لذا حرکت و انتقال کاتیون‌ها در سراسر پوسته کوتیکولی برگ در محلول‌های دارای بار مثبت‌تر آسان‌تر است (Franke, 1967; Tyree, 1990; Mengel, 2002) اگرچه در ترکیبات مختلف، مقدار اسیدیته برای افزایش کارایی جذب برگی متفاوت گزارش شده (Wójcik, 2004). اما در این راستا، مقدار بهینه اسیدیته محلول‌های به‌کار رفته برای بالاترین مقدار جذب برگی اکثر ترکیبات غذایی بین ۳ الی ۵/۵ است گزارش شده است (Kannan, 1980). با توجه به این یافته‌ها می‌توان عنوان داشت که کاهش اسیدیته محلول سیلیکاته سبب افزایش بار مثبت و در نتیجه حرکت آسان‌تر آن در لایه‌های برگی و افزایش کارایی نفوذ و جذب در برگ سیب‌زمینی شده است. لذا باتوجه به نتایج حاصل از این تحقیق اسیدیته ۵، اسیدیته بهینه هر دو اندازه ذرات سیلیکاته نانو و میکرو بود و در اندازه نانو علی‌رغم افزایش کارایی جذب باز هم کاهش اسیدیته توانست اثر مثبت بر بهبود فرآیند جذب و انتقال در بخش هوایی سیب‌زمینی داشته باشد.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع تیمار و اسیدیته بر صفات فتوسنتز، تعرق، عملکرد ریزغده، غلظت و مقدار سیلیسیم اندام هوایی گیاهچه‌های سیب زمینی

Table 6- Mean comparison of interaction effects of spraying type and acidity on photosynthesis, transpiration, mini-tuber yield, concentration and amount of Si in seedling potato shoot

تیمار محلول‌پاشی Foliar application treatment	pH	Trials صفات: فتوسنتز Photosynthesis (μmol CO_2 m^{-2} s^{-1})	تعرق Transpiration (mmol m^{-2} s^{-1})	عملکرد ریزغده Mini-tuber yield (g per plant)	غلظت Si در اندام هوایی Si concentration in shoot	مقدار سیلیسیم در اندام هوایی Si amount in shoot (g)
Water	11.3	4.5	2.75	25.8	1.36	2.1
	7	5.5	2.62	23.7	1.08	2.06
	5	4.0	1.69	21.4	0.99	1.81
Micro Si (400 mg l^{-1})	11.3	4.6	1.37	24	1.84	3.02
	7	5.6	1.78	25.4	1.8	3.15
	5	5.5	1.35	26.7	1.81	3.31
Nano Si (400 mg l^{-1})	11.3	5.2	1.43	24.8	1.82	3.31
	7	5.7	1.67	27.5	1.75	3.65
	5	6.1	1.53	29.8	1.85	3.57
LSD 5%		0.63	0.301	2.47	0.166	0.251

نتیجه‌گیری

محلول‌پاشی سیلیکات سدیم تا غلظت بهینه ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیر مثبتی بر پارامترهای فتوسنتزی، رنگدانه‌ها و عملکرد اجزای عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی داشت. نانو ذرات سیلیکات سدیم در مقایسه با ذرات میکرو در غلظت‌های کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر در غالب صفات مورد بررسی اثر مثبت بالاتری داشت. اما در غلظت‌های بالاتر سیلیکات سدیم اثرات سمیت گیاهی بر گیاهچه‌های سیب‌زمینی داشت و کاربرد ذرات نانو تأثیر منفی بیشتری نشان داد. اسیدیته محلول سیلیکات سدیم در اثرات فیزیولوژیک، فتوسنتزی و عملکرد گیاهچه‌های سیب‌زمینی بسیار مؤثر بود. کاهش اسیدیته محلول‌پاشی ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم از ۱۱/۳ به ۷ و ۵ افزایش فتوسنتز، کاهش تعرق، افزایش عملکرد غده و افزایش مقدار سیلیسیم اندام هوایی را در پی داشت. در مجموع اسیدیته ۵، اسیدیته بهینه هر دو اندازه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بود و در این اسیدیته بیشترین اثرات مثبت سیلیسیم در گیاهچه‌های سیب‌زمینی به‌دست آمد.

سپاسگزاری

از حوزه معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی و حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد جهت تأمین اعتبار این تحقیق با کد ۲/۳۸۷۸۷ قدردانی می‌شود.

References

1. Adtina, M. H., and Beasford, R. T. 1986. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. Journal Annual of Botany 58: 343-351.
2. Arnon, D. 1949. Copper enzyme polyphenoloxides in isolated chloroplast in *Beta vulgaris*. Plant Physiology 24: 1-15.
3. Asmar, A., Castro, E. M., Pasqual, M., Pereira, F. J., and Soares, J. D. R. 2013. Changes in leaf anatomy and

photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. Scientia Horticulturae 161: 328-332.

4. Cherif, M., and Belanger, R. R. 1992. Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrient solutions to suppress *Pythium ultimum* on long english cucumber. Journal of Plant Disease 76 (10): 1008-1011.
5. Epstein, E. 1999. Silicon, Annual Review. Plant Physiology and Plant Molecular Biology 50: 641-664.
6. Elliot, C. L., and Snyder, G. H. 1991. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. Agricultural and Food Chemistry 39: 1118-1119.
7. Franke, W. 1967. Mechanisms of foliar penetration of solutions. Annual review. Plant Physiology 18: 281-300.
8. Haghighi, M., and Pessarakli, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia Horticulture 161: 111-117.
9. Hashemi, A., Abdolzadeh, A., and Sadeghipour, H. R. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. Soil Science and Plant Nutrition 56 244-253.
10. Hu, Y., and Schmidhalter, U. 2005. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 168: 541-549.
11. Kannan, S. 1980. Mechanisms of foliar uptake of plant nutrients: accomplishments and prospects. Journal of Plant Nutrient 2: 717-735.
12. Lichtenthaler, H. K., and Wellburn, A. R. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochemical Society Transactions 11: 591-592.
13. Liang, Y. C., Shen, Q. R., Shen, Z. G., and Ma, T. S. 1996. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. Journal of Plant Nutrition 19. 173-183.
14. Lim, T. H., Cheol, S. Y., Choi, S. P., and Dhital, S. 2004. Application of giberelic acid and paclobutrazol for efficient production of potato (*Solanum tuberosum* L.) minitubers and their dormancy breaking under soilless culture system. Journal of Korea Society Horticulture Science 45 (4): 189-193.
15. Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L., and Davy, A. J. 2013. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. Plant Physiology and Biochemistry 63: 115-121.
16. Mengel, K. 2002. Alternative or complementary role of foliar supply in mineral nutrition. Acta Horticalture 594: 33-48.
17. Mohaghegh, P., Shirvani, M., and Ghasemi, S. 2010. Silicon application effects on yield and growth of two cucumber genotypes in hydroponics system. Journal of Science technology and greenhouse culture 1 (1): 35-40. (in Persian with English abstract).
18. Nasri, M., Khalat bari, M., Pak nejad, F., Hasanpor, J., and Kasraie, P. 2008. Effect of different levels of silic spraying and plant density on some quantitative characterestics of rapeseed (*Hyola-42*) in varamin condition. Iranian agricultural science 315-325. (in Persian with English abstract).
19. Ozturk, G., and Yildirim, Z. 2010. A comparison of field performances of minitubers and micro tubers used in seed potato production. Turkish Journal of Field Crops 15 (2): 141-147.
20. Rashed Mohassel, M. H., Aliverdi, A., and Rahimi, S. 2011. Optimizing dosage of sethoxydim and fenoxaprop-p-ethyl with adjuvants to control wild oat. Industrial Crops and Products 34: 1583-1587.
21. Romero-Aranda, M. R., Jurado, O., and Cuartero, J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. Journal of Plant Physiology 163: 847-855.
22. Saadatian, B., and Kafi, M. 2015. Study of nutritional role of silicon nano-particles on physiological characteristics of minituber potato production. Journal of Plant Production Research 22: 173-189. (in Persian with English abstract).
23. Sairam, R. K. 1994. Effect of moisture stress on physiological activities of two con-trasting wheat genotypes. Indian Journal. Experimental of Biology 32: 594-597.
24. Samuels, A. L., Glass, A. D. M., Ehret, D. L., and Menzies, J. G. 1993. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: Changes in surface characteristics. Journal of Annual Botany 72: 433-440.
25. Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., and Li, J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. Journal of Plant Physiology 167: 1248-1252.
26. Tuna A. L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., and Girgin, A. R. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environmental Experiment of Botany 62: 10-16.
27. Tyree, M. T., Scherbatskoy, T. D., and Tabor, C. A. 1990. Leaf cuticles behave as asymetric membranes. Evidence from the measurement of diffusion potentials. Plant Physiology 92: 103-109.
28. Wójcik, P. 2004. Uptake of mineral nutrients from foliar fertilization (Review). Journal of Fruit and Ornamental Plant Research 12: 201-218.
29. Zare, H. R, Ghanbarzadeh, Z., Behdad, A., and Mohsenzadeh, S. 2016. Effect of silicon and nano silicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings. Iranian Journal of plant biology 7 (26): 59-74. (in Persian with English abstract).

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 16, No. 2, Summer. 2018, p. 355-368

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، ص. ۳۶۸-۳۵۵

Determination of Optimal Acidity and Concentration of Nano and Micro Sodium Silicate on Efficiency of Foliar Application of Potato Plantlets

M. Kafi[1*]- B. Saadatian[2]

Received: 03-08-2016
Accepted: 01-03-2017

Introduction

Silicon (Si) is one of the most abundant elements in Earth's crust. It has been regarded as an essential element in a number of species of the Poaceae and Cyperaceae, however it has not been possible to demonstrate that it is essential to all higher plants because direct evidence is still lacking that it is part of the molecule of an essential plant constituent or metabolite. Recently, the role of Si in plant metabolism has received increasing attention. It has been suggested that Si may be involved in metabolic or physiological and/or structural activity in higher plants in normal condition and exposed to abiotic and biotic stresses. In many researches, it has been found that Si improved water use efficiency, photosynthesis, membrane stability index and yield in crops. The use of nano-compound material has been given a lot of attention by the agricultural researchers, especially by those who examine the characteristics of the seeds, although the exact mechanism of their actions is not well understood. Nanomaterials, because of their tiny size, show unique characteristics. Previous work reported that nano sodium silicate was affected on physiological and yield of potato seedlings in greenhouse. Acidity was determinant factor in foliar application of solutions. However, studies have not been paid attention to this factor.

Materials and Methods

This research was conducted as a factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications at the faculty of agriculture's research greenhouse, Ferdowsi University of Mashhad, in 2013. Plantlets of Agria cv. produced from nodal tissue culture in Murashinge and Skoog (MS) medium. After 25 days, Free disease and uniform plantlets exported to plastic pots with 12 cm diameter and 30 cm height. Perlite, cocopite and sand with 3:3:4 ratios, formed the substrate. Potato plantlets were fed with corrected Hoagland solution. In the first experiment, Treatments were particle size of sodium silicate (nano and micro) and eleven concentrations (Non-spraying, Distilled water, 100, 200, 300, 400, 500, 600,700, 800 and 900 mg l^{-1}). The pH of Concentrations were measured and was in the range of 7.5 (distilled water) and 11.6. In the second experiment, the optimal concentrations nano and micro particles of first experiment and three pH levels (5, 7 and 11.3) were used. In both experiments, membrane stability index, photosynthesis parameters, chlorophyll a, b and cartenoids, shoot dry weight, silicon concentration and amount, yield and yield components of minituber were measured.

Results and Discussion

In the first experiment, the results showed that with increasing silicon concentration up to 400 mg l^{-1}, photosynthesis, chlorophyll a and yield of potato minituber, significantly increased. Membrane stability index increased, transpiration reduced, water use efficiency increased, chlorophyll a and cartenoids of potato leaves increased as a result of nano and micro silicon foliar application up to 400 mg $l^{-1}$and effects of nano particles on traits more than of micro particles. But, both of silicon particle sizes had a negative effect on traits in higher concentrations. In second experiment, effect of nano silicon particles to improve membrane stability index, chlorophyll b, mean of minituber weight and shoot dry weight traits was higher than the micro particles by 5.4, 9.7, 9 and 12 percentages, respectively. Also, membrane stability index, shoot dry weight and water use efficiency trials, improved in foliar application with pH 5 compared to 11.3 by 8.8, 6.11 and 21.3 percentage, respectively. Reducing the acidity of nano and micro-particles sprayed silicon was caused to increasing of photosynthesis, decreasing of transpiration, increasing of silicon amount of shoot significantly.

1- Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Ph.D Student of Crop physiology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.kafi@um.ac.ir)

Conclusions

Optimal concentration was obtained to foliar application of nano and micro Sodium silicate particles. Overall, the best treatments were 400 mg l^{-1} sodium silicate and pH=5.

Keywords: Chlorophyll, Membrane stability index, Minituber yield, Photosynthesis, Water use efficiency